

焦展,安胜军,王崑声,等. 航天搭载对油葵的诱变效应[J]. 江苏农业科学,2015,43(11):128-136.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.11.038

# 航天搭载对油葵的诱变效应

焦展<sup>1</sup>, 安胜军<sup>1</sup>, 王崑声<sup>2</sup>, 柴锡庆<sup>1</sup>, 胡良元<sup>2</sup>, 邵铁梅<sup>1</sup>, 许海民<sup>2</sup>,  
李雪<sup>1</sup>, 仵陶<sup>1</sup>, 陈晓威<sup>1</sup>, 刘培<sup>1</sup>, 温昕<sup>1</sup>

(1. 河北化工医药职业技术学院/河北省高校生物反应器与蛋白类药物开发应用技术研发中心, 河北石家庄 050026;

2. 中国航天系统科学与工程研究院, 北京 100048)

**摘要:**为研究航天搭载对油葵的诱变效应,利用“神舟八号”飞船搭载油葵种子,返回地面后进行种植,并观测种子出苗状况和 SP<sub>1</sub>、SP<sub>2</sub>、SP<sub>3</sub> 代植株生长特性及结实种子百粒质量的变化。结果表明:航天搭载对油葵种子的发芽状况没有明显影响;通过航天搭载可增加油葵变异幅度,扩大选择范围;诱变效应在航天搭载当代即有所体现,SP<sub>2</sub> 代变异表现较为明显且出现新的变异,至 SP<sub>3</sub> 代多数变异性状能够保持;经过航天搭载可获得株高变化、叶片大小变化、叶片叶绿素含量变化、花盘变大、花期延长、提早开花、种子百粒质量显著增高等特征的变异。由此可以看出,航天搭载的油葵对已转化的外源基因至少能够保持至 SP<sub>3</sub> 代,经过航天搭载获得的油葵观赏性状的变异也成为观赏向日葵研究不可或缺的宝贵资源。

**关键词:**油葵;诱变效应;航天搭载;生物学性状;SP<sub>1</sub> 代;SP<sub>2</sub> 代;SP<sub>3</sub> 代;观赏性状;变异

**中图分类号:** S565.503 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2015)11-0128-09

向日葵 (*Helianthus annuus* L.) 是菊科向日葵属植物,油葵即油用向日葵,是我国四大油料作物之一,同时也可作为观赏植物。农学和生物学工作者在向日葵的新品种选育、遗传转化研究、高产栽培技术等方面已开展大量工作,并且选育出一系列优良高产的新品种<sup>[1-4]</sup>。航天育种由于具有有利变异多、育种周期短等优势,近年来已被广泛关注,并取得了令人瞩目的研究成果<sup>[5-11]</sup>。目前,利用空间诱变向日葵已有部分研究。2006 年,汤泽生等利用卫星搭载向日葵种子,成功获得 SP<sub>2</sub> 代花部变异株<sup>[12]</sup>;随后,陈卫英等对航天诱变向日葵花部形态特征、传粉生态学以及突变株系的盛花期光合效应

进行研究<sup>[13-14]</sup>;沈顺等对航天诱变 SP<sub>1</sub> 代向日葵顶芽突变系进行性状考察,为向日葵新品种选育提供良好材料<sup>[15]</sup>;此外, Yang 等利用 SSR 标记对向日葵航天诱变材料进行遗传背景分析,为形态变异提供分子生物学证据<sup>[16]</sup>。但油葵的航天诱变效应研究还未见报道。本试验对 2011 年神舟八号飞船航天搭载的油葵种子和后代植株进行有关生物学方面的观察与研究,并对航天搭载对油葵的诱变效应进行初步探讨,以期对油葵航天育种和转基因研究提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

本试验中用于航天搭载的油葵种子均为罗马尼亚精选油葵种子恢复系,由河北省半干旱研究中心提供。用于航天搭载的油葵种子分为 5 组,分别编号为 H1、H2、H3、H4、H14,以相应未经航天搭载处理的种子为对照,分别编号为 CK1、CK2、CK3、CK4、CK14。其中, H1、CK1 为油葵转胰岛素基因阳性后代 T<sub>3</sub> 代种子; H2、CK2 同为油葵转胰岛素基因阳性后代 T<sub>5</sub> 代种子; H3、CK3 为转胰岛素基因 T<sub>2</sub> 代种子; H4、CK4

收稿日期:2015-03-30

基金项目:河北省科技支撑计划(编号:09276418D-1)。

作者简介:焦展(1982—),女,河北赵县人,硕士,讲师,研究方向为植物组织培养和转基因及栽培。E-mail: jiaozhan959@aliyun.com。

通信作者:安胜军,博士,教授,研究方向为植物生物反应器构建和蛋白类药物开发。E-mail: anshijun@yahoo.com。

[5] 刘国权,田光豪,卢志刚,等. 不同规格浮盘对井窖式移栽烟苗的影响[J]. 天津农业科学,2014,20(10):101-103,108.

[6] 李迪,张林,左学玲,等. 烤烟膜下小苗移栽的配套技术及推广应用效果[J]. 河南农业科学,1999(10):37-38.

[7] 张继,潘和平,杨天沛,等. 烤烟膜下小苗移栽育苗方式初探[J]. 广东农业科学,2013(1):24-26.

[8] 刘许生,孔繁武,张茂文,等. 烤烟直播漂浮育苗技术[J]. 江西农业学报,2005,17(4):95-96.

[9] 刘加红,张瑞勤,代绍明,等. 烤烟漂浮育苗不同育苗盘筛选研究[J]. 湖南农业科学,2014(16):9-11.

[10] 赵世杰,刘华山,董新纯. 植物生理学实验指导[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,1998:25-34.

[11] 韩锦峰,郭培国. 氮素用量、形态、种类对烤烟生长发育及产量品质影响的研究[J]. 河南农业大学学报,1990,24(3):275-285.

[12] 韩锦峰,齐群钢. 烟株根系活力与烟叶性状、化学成分的相关关系研究及提高根系活力的栽培措施[J]. 中国烟草,1988(2):11-14.

[13] 刘国顺,习向银,时向东,等. 钾水平对烤烟漂浮育苗烟苗生长发育的影响[J]. 河南农业科学,2003(1):14-17.

[14] 魏书奎,于继洲,宣有林,等. 核桃叶片的叶绿素含量与光合速率关系的研究[J]. 北京农业科学,1994(5):31-33.

[15] 白岩,刘好宝,史万华,等. 苗盘高度和育苗密度对烟苗生长发育的影响[J]. 核农学报,2012,26(7):1082-1086.

为油菜转阿朴脂蛋白 A-I 米兰突变体基因 T<sub>2</sub> 代种子; H14、CK14 为非转基因种子。转基因油菜种子由河北省高校生物反应器与蛋白类药物开发应用技术研发中心提供。H3、CK3 为通过去 1 张子叶转化并结合嫁接方法获得的转基因种子, 其余转基因种子为花粉管通道方法获得。

## 1.2 研究方法

1.2.1 种子航天搭载过程 用于航天搭载的油菜种子于 2011 年 10 月 2 日装入“神舟八号”飞船返回舱。“神舟八号”飞船于 2011 年 11 月 1 日 5 点 58 分由火箭发射升空, 经过 397 h 的轨道运行, 返回舱(携带供试种子)于 2011 年 11 月 17 日 19 点 32 分返回地面, 11 月 21 日开仓取出种子。

1.2.2 航天搭载种子的播种和繁育 航天搭载油菜种子(H1、H2、H3、H4、H14)与对照种子(CK1、CK2、CK3、CK4、CK14)于 2012 年 4 月 29 日在温室苗床单粒播种进行育苗, 共播种 311 粒, 2012 年 5 月 12 日移栽至大田, 定植株行距为 45 cm×45 cm, 为 SP<sub>1</sub> 代植株, 每个组设对照 60 株。SP<sub>1</sub> 代变异单株所结种子单独收获, 没有变异的种子组内混合收获。SP<sub>1</sub> 代植株上收获的种子于 2012 年 11 月 15 日在海南三亚播种, 进行 SP<sub>2</sub> 代植株的种植。SP<sub>2</sub> 代植株包括 SP<sub>1</sub> 变异的单株后代(每个变异单株后代播种 20 株)+SP<sub>1</sub> 不变异的单株群体(每个组播种 150 株), SP<sub>2</sub> 代确保包含 SP<sub>1</sub> 留下的所有单株后代且群体不少于 1 000 株, 每个组设对照 60 株。重点观察变异株系, 根据育种目标定向选择。2013 年 4 月 29 日, 将海南省收获的种子播种于河北邯郸鸡泽, 为 SP<sub>3</sub> 代植株, 包括 SP<sub>2</sub> 保留变异性状的单株后代(每单株后代播种 25 株)+SP<sub>2</sub> 不变异的单株群体(每组播种 150 株), 总种植数不少于 4 000 株, 每组设对照 100 株。对 SP<sub>3</sub> 代植株种植和筛选, 并对生长特性进行观察记录。

1.2.3 田间调查指标 每株挂牌、套袋, 人工自花授粉, 并进行田间调查, 单株收获, 进行统计分析。田间调查内容包括出苗率、出苗时间、开花起止时间、花期株高、叶片长宽、叶片叶绿素含量、花期花盘直径以及结实种子百粒质量等。对航天诱变材料 SP<sub>1</sub> 代主要性状的变化与对照进行对比分析, 比较其平均值、变异幅度和变异系数[变异系数  $CV = (\text{标准差} / \text{平均值}) \times 100\%$ ]的差异, 并对性状平均值进行差异显著性检验。性状在“对照平均数 ± 2 倍标准差”范围以外的植株当作突变株, 并结合育种目标优选有益变异单株。此外, 统计每代植株各测量指标的平均值、变异频率(总变异频率 = 每代变异总数/同代种植群体总数 × 100%, 某品种变异频率 = 某品种每代变异数/该品种同代种植总数 × 100%)<sup>[17]</sup>。叶绿素测量方法采用丙酮乙醇混合液法<sup>[18]</sup>。

1.2.4 转基因材料的阳性率统计 从航天搭载材料和对照的 SP<sub>1</sub> ~ SP<sub>3</sub> 代中, 每个品种每代随机选择 3 个株系(SP<sub>1</sub> 代至少检测 20 株, SP<sub>2</sub> ~ SP<sub>3</sub> 代每代至少检测 60 株)对植株进行目的基因的 PCR 检测。统计阳性率, 阳性率 = PCR 呈阳性植株数/该株系当代统计植株总数 × 100%。胰岛素基因 PCR 引物序列: 上游引物为 5′ - CGGGGTACCTCGTCTA-AATTTTCAGCCTATCGACG - 3′, 下游引物为 5′ - CGAGCTCT-TAGTTGCAGTAATTTTCTAG - 3′。阿朴脂蛋白 A-I 米兰突变体基因引物序列: 上游引物为 5′ - CGCGGATCCTGGTC-CCAAGGGGTAGC GATGAACCACCGCAGT - 3′, 下游引物为

5′ - CGAGCTCTTATTGTGTGTTAAGTTTCTTTG - 3′。

1.2.5 数据统计分析 数据处理用 Excel 2003 和 DPS 7.05 软件进行分析, 显著水平为 0.05。

## 2 结果与分析

### 2.1 航天搭载油菜种子的出苗期和出苗率

经过航天搭载, 供试的 5 个品种在播种 5 d 后可正常出苗, 1 周后出苗数达到顶峰, 10 d 后不再有新的幼苗萌出。各处理与对照出苗期没有明显差异, 均在 5 ~ 7 d 完成。在出苗率方面, 各材料的出苗率均可达 70% 左右。试验中也发现个别植株虽发芽, 但是芽体不正常弯曲, 或者没有生长点, 然而这只是个别现象。由航天搭载当代油菜种子的出苗情况可以看出, 各处理与对照之间的出苗率均没有明显差异, 由此可见航天搭载油菜种子对其生活力、出苗速度和出苗率均无明显的影响(表 1)。

表 1 航天搭载油菜种子与对照出苗时间和出苗率的比较

航天编号	播种数 (粒)	出苗数 (株)	出苗率 (%)	出苗时间 (d)
H1	32	21	65.63	7
CK1	63	42	66.67	7
H2	189	137	72.49	6
CK2	63	45	71.43	6
H3	24	15	62.50	6
CK3	66	45	68.18	5
H4	36	27	75.00	6
CK4	63	45	71.43	6
H14	30	23	76.67	5
CK14	60	45	75.00	6

注: 出苗时间以出苗总数 80% 以上种子出苗计算。

### 2.2 航天搭载对油菜 SP<sub>1</sub> 代生长期主要性状的影响

由表 2 可以看出, 从株高、叶片长宽、花盘直径和开花持续时间等生长期主要性状考察, 航天搭载的 5 组材料的平均值与对照并没有明显差异。但是从变异范围和变异系数来看, 航天搭载对各组材料的诱变效应程度各不相同。从株高来看, H1、H3 的诱变效应不明显, H2 的变异范围变宽, 从 53 ~ 74 cm 变为 44 ~ 91 cm。H4、H14 的标准差、变异系数均大幅度高于对照, 变异范围也变大。此外, 株高在矮化、增高 2 个方向均有变化。各组航天搭载的材料叶片长宽的数值变化范围较小, 只有 H4、H14 的标准差、变异系数比对照大幅度增加, H4 的变异范围略有增大, H14 主要为负向变异, 航天处理最大值与对照最大值差异很小, 但航天处理最小值(长 19.16 cm、宽 16.50 cm)与对照最小值(长 24.17 cm、宽 20.83 cm)差异较大。在花盘直径方面, H2、H4 的标准差、变异系数和变异范围与对照相比相差较大, 而其他几组数据处理和对照间各指标的差值较小。经航天搭载, H1、H4 植株的开花持续时间变化范围较对照大幅度变宽, 且为正向变化, 即航天搭载能够诱导油菜表现花期延长的变异趋势。

经过航天搭载, 在供试的几个处理中, H4 生长期各主要性状与对照相比均有不同程度的变化, 在本试验中 SP<sub>1</sub> 代对航天诱变较敏感。H1 的花期变异范围增大, 并且是正向变异(花期延长), H2 的株高、花盘直径的变异范围增大, H14 的株高、叶片长宽变异范围增大, 而 H3 对航天搭载的诱变效应

表 2 航天搭载对油菜 SP<sub>1</sub> 代生长期主要性状的诱变效应

编号	株高			叶片长			叶片宽		
	均值 (cm)	变异范围 (cm)	变异系 数(%)	均值 (cm)	变异范围 (cm)	变异系 数(%)	均值 (cm)	变异范围 (cm)	变异系 数(%)
H1	59.00 ± 4.40	54.00 ~ 64.00	7.45	25.33 ± 3.58	19.33 ~ 29.33	14.13	21.26 ± 3.37	16.33 ~ 26.67	15.83
CK1	58.85 ± 3.18	54.00 ~ 64.00	5.38	25.96 ± 3.40	19.00 ~ 29.33	13.11	22.04 ± 2.94	16.67 ~ 25.67	13.33
H2	63.27 ± 8.90	44.00 ~ 91.00	14.07	26.55 ± 2.56	20.67 ~ 29.83	9.65	24.33 ± 2.75	18.83 ~ 30.17	11.29
CK2	64.00 ± 6.46	53.00 ~ 74.00	10.09	26.49 ± 2.51	20.16 ~ 28.66	9.47	24.23 ± 2.78	18.67 ~ 29.17	11.46
H3	64.45 ± 5.26	56.00 ~ 71.00	8.20	26.98 ± 2.06	20.69 ~ 30.12	8.03	24.87 ± 3.35	19.25 ~ 28.89	7.69
CK3	63.77 ± 5.07	55.00 ~ 70.00	7.95	27.22 ± 1.49	21.53 ~ 29.66	6.93	24.59 ± 2.87	18.89 ~ 28.33	6.93
H4	65.20 ± 8.56	59.00 ~ 79.00	13.12	28.46 ± 1.52	26.33 ~ 30.33	5.32	25.07 ± 2.05	22.67 ~ 28.00	8.17
CK4	64.60 ± 2.97	64.00 ~ 68.00	4.59	28.46 ± 0.76	27.17 ~ 29.17	2.66	24.93 ± 0.60	24.33 ~ 25.83	2.39
H14	68.25 ± 14.86	47.00 ~ 78.00	21.78	26.92 ± 5.33	19.16 ~ 31.33	19.80	24.46 ± 5.35	16.50 ~ 28.17	21.90
CK14	66.20 ± 8.66	57.00 ~ 73.00	13.08	27.22 ± 1.67	24.17 ~ 30.50	6.12	24.47 ± 2.18	20.83 ~ 27.17	8.91

编号	花盘直径			开花持续时间		
	均值 (cm)	变异范围 (cm)	变异系 数(%)	均值 (d)	变异范围 (d)	变异系 数(%)
H1	16.25 ± 2.68	12.00 ~ 20.00	16.48	12.75 ± 3.77	10.00 ~ 18.00	29.61
CK1	16.64 ± 2.30	12.00 ~ 19.00	13.85	11.71 ± 1.50	9.00 ~ 14.00	12.77
H2	18.36 ± 2.60	14.50 ~ 24.00	14.18	12.73 ± 1.47	10.00 ~ 16.00	11.52
CK2	18.31 ± 1.61	14.00 ~ 21.00	8.80	12.45 ± 1.44	10.00 ~ 14.00	11.56
H3	17.80 ± 1.48	14.50 ~ 19.50	8.34	12.67 ± 1.45	10.00 ~ 15.00	11.43
CK3	16.79 ± 1.25	14.50 ~ 19.00	7.45	12.50 ± 1.34	10.00 ~ 14.00	10.76
H4	19.30 ± 2.05	17.50 ~ 22.00	10.61	12.73 ± 2.68	12.00 ~ 18.00	17.65
CK4	19.50 ± 0.94	18.00 ~ 20.50	4.80	12.80 ± 1.79	10.00 ~ 14.00	13.98
H14	19.75 ± 2.90	17.00 ~ 23.50	14.69	12.75 ± 0.96	12.00 ~ 14.00	7.51
CK14	19.82 ± 1.99	16.00 ~ 23.00	10.05	11.23 ± 1.09	10.00 ~ 14.00	9.73

表现不敏感。说明航天搭载对 SP<sub>1</sub> 代生长期主要性状有一定影响,会扩大某些性状的变异范围,但不同性状在各材料上的表现不尽相同。

试验尽可能完整地保全了各种变异类型,选择并标记了在整个生育期中与对照表现差异的单株,SP<sub>1</sub> 代植株中以超过标准差 2 倍为依据确定的变异株,共 13 株(表 3)。H1-4 植株花期明显延长;H2 中获得变异单株 7 株,其中株高变异的有 6 株,叶片长宽变大的 1 株,花盘直径变大的 3 株;H4-1 株高明显增高,花盘变大,H4-4、H4-5 花期明显延长;H14-2 株叶片长宽变大,此外 H14-4 植株矮化,并且叶片长宽明显变小;而 H3 中没有发现与对照有明显差异的单株。试验表明,空间搭载条件诱发了油菜多种生长期性状变异,其中一些变异在处理当代即表现出来。

2.3 航天搭载油菜 SP<sub>2</sub>、SP<sub>3</sub> 代突变性状的表现

SP<sub>1</sub> 代筛选出的突变植株收获后播种形成 SP<sub>2</sub> 代群体,每个突变株系播种 20 株,其余为变异植株,每组播种约 150 株,SP<sub>2</sub> 代群体不少于 1 000 株。由表 3、表 4 可知,部分 SP<sub>1</sub> 代显现的突变性状在 SP<sub>2</sub> 代能够保持,但是部分突变性状不再表现(如 H2-1、H2-12、H2-16 的平均株高与对照并没有明显差异)。SP<sub>2</sub> 代新表现一些突变性状,如 H1-1-1 的花盘直径变大和开花持续时间延长、H2-3-1 植株叶片变大、H2-9-1 的株高减小而叶片长宽增大、H2-30-1 的花盘直径变大、H3-1-1 的开花持续时间延长、H4-6-1 的株高变大等。此外,在 SP<sub>2</sub> 代 H1-4-X 等突变株系的始花时间较对照提前 2 d。这说明航天搭载油菜在 SP<sub>1</sub> 代仅有少数突

变性状表现,而突变性状在 SP<sub>2</sub> 代会较明显地显现。由表 5 可知,SP<sub>2</sub> 代表现与对照差异显著的性状在 SP<sub>3</sub> 代多数能够保持(如 H1-1、H2-14、H4-5、H14-2 突变株系),其均值明显大于相应对照。但是,这些突变性状在以后世代是否能够遗传,且这些性状的变异到底是环境因素引起还是可稳定遗传的变异,尚须要进一步深入研究,并提供分子生物学证据。

表 3 航天搭载油菜 SP<sub>1</sub> 代植株的性状突变

组号	突变株	株高 (cm)	叶长 (cm)	叶宽 (cm)	花盘直径 (cm)	开花持续时间 (d)
H1	H1-4					18.00
H2	H2-1	48.00				
	H2-6	80.00				
	H2-8	51.00			24.00	
	H2-12	44.00				
	H2-14	90.00	31.67	30.17	22.50	
	H2-16	49.00				
H4	H2-31				23.00	
	H4-1	79.00			22.00	
	H4-4					18.00
H14	H4-5		30.33			18.00
	H14-2		31.33	28.83		
	H14-4	47.00	19.17	16.50		

在本试验中,H2-14 自 SP<sub>1</sub> 代起株高、叶片长宽和花期花盘直径等指标明显大于对照,且 SP<sub>2</sub> 代、SP<sub>3</sub> 代能够保持这一性状;同样,H14-2 在 SP<sub>1</sub> 代株高、叶片长宽上也表现明显正向变异,长势变强,且在 SP<sub>2</sub> 代、SP<sub>3</sub> 代能够保持;而 H14-4

表 4 航天搭载对油葵 SP<sub>2</sub> 代变异植株生长期性状的影响

编号	株高			叶片长			叶片宽		
	均值 (cm)	变异范围 (cm)	变异系 数(%)	均值 (cm)	变异范围 (cm)	变异系 数(%)	均值 (cm)	变异范围 (cm)	变异系 数(%)
CK1									
H1 - 4 - X									
H1 - 1 - 1									
CK2	68.80	5.76	8.37	26.22	2.06	7.86	24.55	1.98	8.07
H2 - 6 - X	95.00 *			30.89 *			29.00 *		
H2 - 8 - X	49.00 *								
H2 - 14 - X	92.00 *			32.28 *			31.75 *		
H2 - 31 - X				30.75 *			28.89 *		
H2 - 3 - 1	81.00 *			31.50 *			28.75 *		
H2 - 9 - 1	54.00 *			32.00 *			29.25 *		
H2 - 30 - 1									
CK3									
H3 - 1 - 1									
CK4	67.50	3.75	5.56						
H4 - 1 - X	89.33 *								
H4 - 4 - X									
H4 - 5 - X									
H4 - 6 - 1	85.00 *								
CK14	72.50	7.05	9.72	27.44	1.67	6.09	25.75	2.01	7.81
H14 - 2 - X	93.00 *			30.89 *			29.85 *		
H14 - 4 - X	55.00 *			23.35 *			21.25 *		

编号	花盘直径			开花持续时间			开花提前时间 (d)
	均值 (cm)	变异范围 (cm)	变异系 数(%)	均值 (d)	变异范围 (d)	变异系 数(%)	
CK1	19.20	2.05	10.68	10.75	1.50	13.95	
H1 - 4 - X				15.15 *			2.00
H1 - 1 - 1	23.00 *			16.00 *			1.00
CK2	18.50	2.03	10.97				
H2 - 6 - X							
H2 - 8 - X	23.00 *						3.00 *
H2 - 14 - X	22.75 *						3.00 *
H2 - 31 - X	23.00 *						
H2 - 3 - 1							
H2 - 9 - 1							
H2 - 30 - 1	23.50 *						
CK3				11.50	1.89	16.43	
H3 - 1 - 1				15.00 *			
CK4	19.20	1.35	7.03	12.15	1.67	13.74	
H4 - 1 - X	23.00 *						
H4 - 4 - X				17.36 *			2.00 *
H4 - 5 - X				17.80 *			3.00 *
H4 - 6 - 1							
CK14							
H14 - 2 - X							
H14 - 4 - X							

注：“\*”表示与对照相比差异显著( $P<0.05$ ),表5、表6同。H1 - 4 - X表示H1 - 4在SP<sub>2</sub>代中保留变异性状的植株,其他带有“X”标记的植株类推;表5、表6同。H1 - 1 - 1、H2 - 3 - 1、H2 - 9 - 1、H2 - 30 - 1、H3 - 1 - 1、H4 - 6 - 1等为SP<sub>2</sub>代新表现突变性状的材料。

则表现明显的负向变异,自SP<sub>1</sub>至SP<sub>3</sub>代,植株矮化,且叶片长宽也明显较对照变小。此外,H1 - 4、H4 - 4、H4 - 5的花期自SP<sub>1</sub>至SP<sub>3</sub>代较对照明显延长,H2 - 8、H2 - 14、H4 - 4、

H4 - 5等SP<sub>2</sub>至SP<sub>3</sub>代开花时间提前。这些宝贵资源可为油葵遗传育种研究提供基础材料,以期从中选育稳定的油葵优良新品种。

表 5 航天搭载油菜突变植株的 SP<sub>3</sub> 代部分单株性状表现(以 H1-1、H2-14、H4-5、H14-2 突变株系为例)

编号	株高			叶片长			叶片宽		
	均值 (cm)	变异范围 (cm)	变异系数(%)	均值 (cm)	变异范围 (cm)	变异系数(%)	均值 (cm)	变异范围 (cm)	变异系数(%)
CK1									
H1-1-1-1									
H1-1-1-3									
H1-1-1-4									
H1-1-1-7									
CK2	66.70	4.89	7.33	27.00	1.98	7.33	25.05	1.85	7.39
H2-14-X-1	95.00*			31.00*			29.50*		
H2-14-X-3	87.00*			31.50*			30.75*		
H2-14-X-7	92.00*			31.50*			31.75*		
H2-14-X-8	89.00*			31.00*			29.50*		
CK4	68.50	4.75	6.93						
H4-5-X-1	90.33*								
H4-5-X-4	91.00*								
H4-5-X-6	85.50*								
H4-5-X-9	87.00*								
CK14	70.25	7.58	10.79	28.00	1.87	6.68	26.25	1.78	6.78
H14-2-X-1	93.00*			32.50*			30.50*		
H14-2-X-2	95.00*			32.00*			30.00*		
H14-2-X-4	94.00*			32.00*			31.25*		
H14-2-X-7	96.00*			32.50*			31.00*		

编号	花盘直径			开花持续时间			开花提前时间 (d)
	均值 (cm)	变异范围 (cm)	变异系数(%)	均值 (d)	变异范围 (d)	变异系数(%)	
CK1	18.50	1.87	10.11	11.00	1.50	10.75	0
H1-1-1-1	23.50*			16.00*			3.00*
H1-1-1-3	23.00*			16.50*			4.00*
H1-1-1-4	22.50*			15.00*			3.00*
H1-1-1-7	23.00*			15.50*			4.00*
CK2	18.00	2.03	11.28				0
H2-14-X-1	22.50*						4.00*
H2-14-X-3	23.00*						3.00*
H2-14-X-7	22.75*						5.00*
H2-14-X-8	23.00*						4.00*
CK4				11.50	1.67	14.52	0
H4-5-X-1				18.00*			4.00*
H4-5-X-4				18.50*			4.00*
H4-5-X-6				17.00*			4.00*
H4-5-X-9				16.00*			5.00*
CK14							
H14-2-X-1							
H14-2-X-2							
H14-2-X-4							
H14-2-X-7							

注:H1-1-1-1、H1-1-1-3、H1-1-1-4、H1-1-1-7 表示 H1-1 株系在 SP<sub>3</sub> 代表现变异性状的植株;H2-14-X-1 表示 H2-14 株系在 SP<sub>3</sub> 代表现变异的植株,其他带有“X”标记的植株类推。

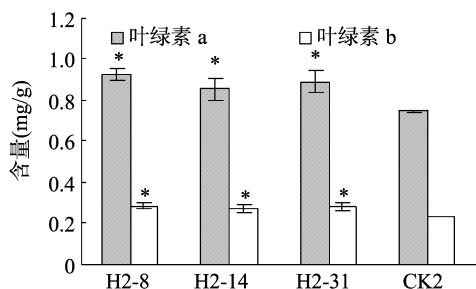
2.4 航天搭载油菜 SP<sub>3</sub> 代植株叶片叶绿素含量变异情况

经过测定,航天搭载 SP<sub>3</sub> 代变异植株 H2-8、H2-14、H2-31、H4-5 的叶片叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量均显著高于相应对照,而其他航天搭载 SP<sub>3</sub> 代植株与对照没有显著性差异(温室中种植)。在大田试验中发现,这 4 个变异株系的叶片叶绿素含量均高于相应对照,并且 H4-4 株系的叶绿素

含量也高于对照,见图 1 至图 4。

2.5 航天搭载油菜 SP<sub>1</sub> 至 SP<sub>3</sub> 代结实种子百粒质量的变化

与生长期主要性状指标明显不同的是,经过航天搭载,供试材料在航天搭载当代即表现出结实平均百粒质量与对照存在不同程度的差异(图 5)。其中,H1 平均百粒质量为 5.98 g,比对照高 1.04 g,而其他 SP<sub>1</sub> 代品种与对照的差异并



标有“\*”表示与对照相比差异显著( $P < 0.05$ )。图2至图5同

图1 航天搭载油葵 H2 变异植株叶绿素含量(温室)

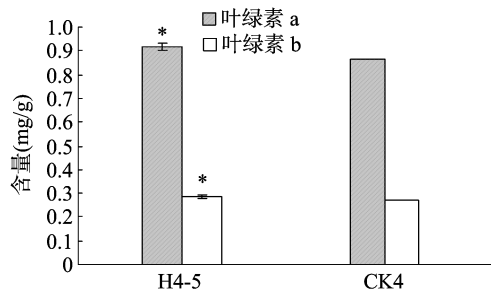


图2 航天搭载油葵 H4 变异植株叶绿素含量(温室)

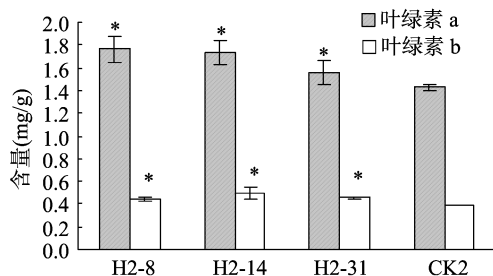


图3 航天搭载油葵 H2 变异植株叶绿素含量(大田)

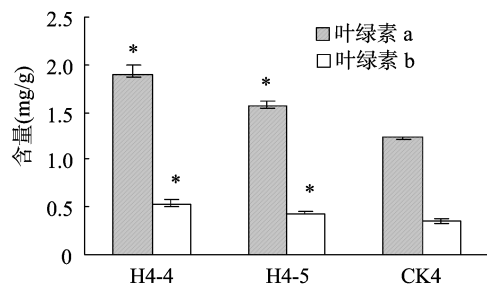


图4 航天搭载油葵 H4 变异植株叶绿素含量(大田)

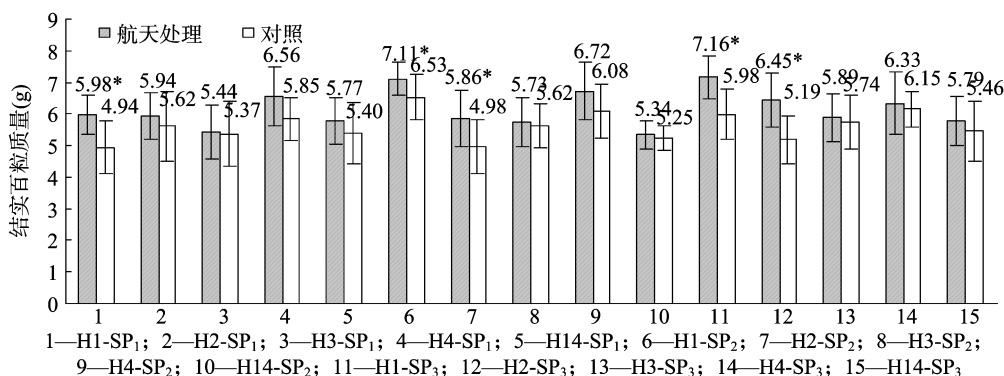


图5 航天搭载油葵 SP<sub>1</sub>、SP<sub>2</sub>、SP<sub>3</sub> 植株结实百粒质量的变化情况

不显著。经过海南省第 2 代种植,其结实情况如下:H1 保持了种子平均百粒质量高于对照的特点,SP<sub>2</sub> 代植株结出的种子百粒质量达 7.11 g;而 H2 也在此代表现出平均百粒质量(5.86 g)显著高于对照(4.98 g),差值达 0.88 g。邯郸鸡泽的 SP<sub>3</sub> 代结实数据同样显示 H1、H2 种子平均百粒质量较对照明显增加。由此可见,航天搭载能够引起某些品种种子平均百粒质量的变化,且能够保持至 SP<sub>3</sub> 代。

试验跟踪调查至 SP<sub>3</sub> 代植株所结种子,H1 - 1、H2 - 8、H2 - 14、H4 - 5、H14 - 2 株系的种子百粒质量均明显高于本处理平均值、对照平均值,有望从中筛选出种子百粒质量增多的突变株系(表 6)。

## 2.6 航天搭载油葵 SP<sub>1</sub> 至 SP<sub>3</sub> 代转基因材料的遗传

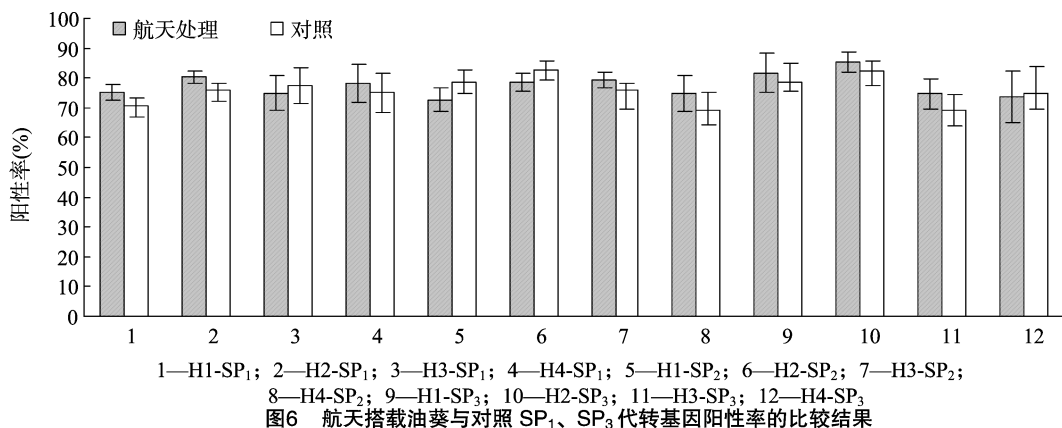
从航天搭载材料和对照的 SP<sub>1</sub> 至 SP<sub>3</sub> 代中,每代随机选择 3 个株系(SP<sub>1</sub> 代约 20 株,SP<sub>2</sub>、SP<sub>2</sub>、SP<sub>3</sub> 代每代约 60 株)对植株进行目的基因的 PCR 检测。图 6 为 4 个品系与对照 3 代中阳性植株比率的平均值。对于航天搭载材料,在 SP<sub>1</sub> 至 SP<sub>3</sub> 代中均检测到一定比率(约为 80%)的阳性植株,且同一品系的 3 代阳性率变化很小,说明对于已转化的外源基因,航天搭载材料至少能够保持至 SP<sub>3</sub> 代。对于同代植株,航天搭

表 6 油葵航天诱变株系与对照 SP<sub>1</sub>、SP<sub>2</sub>、SP<sub>3</sub> 代植株

结实百粒质量的比较

变异株系	植株代数	变异株系平均百粒质量(g)	对照平均百粒质量(g)
H1 - 1	SP <sub>1</sub>	6.68 *	4.94
	SP <sub>2</sub>	7.62 *	6.53
	SP <sub>3</sub>	7.45 *	6.14
H2 - 8	SP <sub>1</sub>	6.60 *	5.62
	SP <sub>2</sub>	6.92 *	4.98
	SP <sub>3</sub>	7.12 *	5.38
H2 - 14	SP <sub>1</sub>	6.14 *	5.62
	SP <sub>2</sub>	6.60 *	4.98
	SP <sub>3</sub>	6.89 *	5.19
H4 - 5	SP <sub>1</sub>	7.03 *	5.85
	SP <sub>2</sub>	7.26 *	6.08
	SP <sub>3</sub>	7.18 *	6.09
H14 - 2	SP <sub>1</sub>	6.44 *	5.40
	SP <sub>2</sub>	5.91 *	5.25
	SP <sub>3</sub>	6.12 *	5.46

注:数据后标有“\*”表示与对照相比差异显著( $P < 0.05$ )。



载材料和对照植株的阳性率接近,没有显著性差异。因此,就本试验范围内,经过航天搭载的油葵对已转化的外源基因至少能够保持至 SP<sub>3</sub> 代,但航天搭载是否会影响外源基因的遗传效率以及外源蛋白的表达效率有待进一步研究。

## 2.7 航天搭载油葵 SP<sub>1</sub> 及后代观赏性状的观察

经过航天搭载的油葵种子大部分可正常发芽,生长速度也和未搭载的没有显著性差异。但是在 SP<sub>1</sub> 代植株中,H2 组中有 2 株发现和普通植株外观有明显差异。变异株的特点是:舌状花变少,花盘内部呈不同程度的突起,部分管状花退化,退化处花盘呈淡黄色硬实状。在该变异株系的 SP<sub>2</sub> 代植

株中,同样发现有此种变化的植株,花盘突起部分变大,且对称,十字分布,花盘外部苞叶数目变多,较正常株多 2~3 倍。植株茎呈多棱状,且棱数为 15~20 棱,与普通植株的圆柱形明显不同。茎上叶片数明显增多,轮生,呈多轮排列。跟踪观察同株系 SP<sub>3</sub> 代植株,发现 2 株完全变异株。变异株的花盘完全变为 4 块突起,十字对称分布,没有管状花部分。花盘苞叶数目和茎的棱数比 SP<sub>2</sub> 代植株更多,叶片多轮,整体植株呈莲花状(图 7)。由于没有可结实部分,该变异株没有留下一代种子。但是 SP<sub>2</sub> 代所结种子播种后仍有剩余,可针对同代的变异性状进行进一步研究。



图7 航天搭载油葵莲花状变异株(SP<sub>3</sub>代)

## 2.8 航天搭载对油葵诱变效应的特点

经过航天搭载,SP<sub>1</sub> 至 SP<sub>3</sub> 代植株与对照相比表现出不同程度的生物学性状差异。经过航天搭载的 5 组种子,其 SP<sub>1</sub> 代种子发芽情况、幼苗生长情况均表现良好;与对照相比,航天诱变植株株高、叶片大小发生变化,生长健壮,开花期花盘较大,结实情况良好(图 8、图 9)。与同代对照相比,航天搭载 SP<sub>2</sub> 代、SP<sub>3</sub> 代个别株系开花时间提前,花盘较大,花期延长,种子百粒质量明显增加等(图 10、图 11)。此外,还发现莲花状变异植株。在整个试验中,供试的 311 粒种子中仅发现 2 粒种子萌发和生长出现畸形情况。由此可见,航天搭载油葵种子使油葵朝着有利农艺性状的方向变异较多。

统计 SP<sub>1</sub> 至 SP<sub>3</sub> 代植株变异率,并作折线图(图 12)。结果表明,SP<sub>1</sub> 代总变异频率为 4.82%。5 个组对航天搭载的



图8 航天搭载油葵 SP<sub>1</sub> 代植株开花状况

敏感性不同,其中 H4 突变率较高为 8.33%,而 H3 在航天搭载当代没有发现变异植株。H3 的 SP<sub>2</sub> 代、SP<sub>3</sub> 代变异频率较

图9 航天搭载油葵 SP<sub>1</sub> 代植株结实状况图10 航天搭载油葵 SP<sub>2</sub> 代植株生长状况图11 航天搭载油葵 SP<sub>2</sub> 代植株结实状况

### 3 结论与讨论

#### 3.1 航天搭载对油葵种子发芽状况的影响

本试验结果证明,经过航天搭载的油葵种子出苗率和出苗状况没有受到影响。这和以往关于空间育种对种子萌芽影响的报道结果不尽相同<sup>[19-22]</sup>。试验中然也发现个别植株虽发芽,但是芽体不正常弯曲,或者没有生长点,然而这只是个别现象,各个品种的平均出芽率、出芽时间与对照都没有显著性差异,这说明航天搭载对油葵种子发芽状况影响不大。这可能与油葵种仁外面不仅有种皮,还有较厚果皮包被,使得其发芽状况对复杂空间诱变条件不敏感有关。

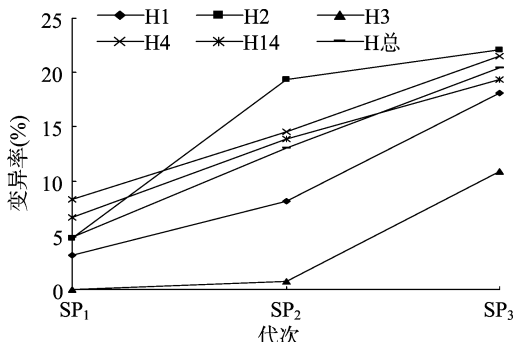
#### 3.2 航天搭载对油葵生物学性状的影响

本试验结果表明,种子经航空诱变后 SP<sub>1</sub> 代各指标的平均值与对照差异不显著,但是航天搭载对 SP<sub>1</sub> 代生长期主要性状有一定影响,会扩大某些性状的变异范围,增强选种效果,利于优良品种的选育,这与乔晓等的研究结果<sup>[23-24]</sup>一致。本研究中航天搭载后 SP<sub>1</sub> 代即有变异性状显现,在 SP<sub>2</sub> 代中表现更丰富,在前人研究中也有类似结论<sup>[22,25-26]</sup>。航天搭载会获得一些性状变异,但是不同材料甚至相同材料的不同植株对航天搭载诱变的敏感性不同,不同性状在各材料上的表现也不同,这与前人的观点<sup>[9,20,23]</sup>一致。本试验也发现,H2-14 的 3 代植株株高、叶片长宽显著高于对照,SP<sub>1</sub> 代结实种子百粒质量也较高,达 6.14 g。SP<sub>2</sub> 代和 SP<sub>3</sub> 代植株同样保留了该有利性状,株系结实种子平均百粒质量分别比对照高 1.62、1.70 g。可见,经过航天搭载后,部分营养生长较为强壮的株系结实情况也明显优于其他株系,且所产生的植株变高、叶片变大、百粒质量提高等变异在 SP<sub>2</sub> 至 SP<sub>3</sub> 代是可以保持的。而 H2-8 株系 SP<sub>1</sub> 代植株营养生长方面没有表现优势,花盘直径显著大于对照,其结实百粒质量明显增大,为 6.60 g;SP<sub>2</sub> 代和 SP<sub>3</sub> 代植株开花期提前和结实期花盘直径明显大于对照,2 代结实百粒质量也较对照明显增高。因此,航天搭载对植株营养生长和生殖生长的影响是复杂的。营养生长方面的适度变异能够促进生殖生长,使种子百粒质量增加。而经过航天搭载的植株后代结实种子百粒质量增加可能与多种因素有关,如花期长短、花盘大小等,以及栽培环境等外界因素。

航天搭载油葵种子确实能够引起植株株高、叶片长宽、花盘直径、花期、种子百粒质量等一系列变化。可能是因为油葵种子在太空强辐射、高真空、地球磁场和微重力等因素的作用下,影响其体内的生理生化反应、细胞分裂、细胞间信息传递、光合呼吸作用以及生长发育等进程,从而产生植物形态和生理代谢的变化,或者可能使油葵控制营养生长、花盘直径、花期或结实的某一基因产生突变<sup>[27-28]</sup>。但是,这些改变完全是由航天搭载诱发的,或者航天搭载只是诱发其中少数指标的变异少数变异与植株生长环境等因素相互作用间接导致其他指标的变异还有待进一步深入探讨。

#### 3.3 航天搭载对油葵的诱变效应

试验结果证明,经过航天搭载,油葵的性状变异不仅在航天搭载当代有所体现,在 SP<sub>2</sub> 代变异株系中表现更明显,而且多数变异能够保持至 SP<sub>3</sub> 代。此外,本试验所得到的丰富变异材料扩大了油葵育种选择范围,得到了一系列如株高变化、叶片变化、花期延长、始花期提前、百粒质量增高等变异,由此

图12 航天搭载油葵 SP<sub>1</sub>、SP<sub>2</sub>、SP<sub>3</sub> 代植株变异情况

其他组明显偏小。经航天搭载的油葵材料的变异性状在 SP<sub>1</sub> 代即开始显现,SP<sub>2</sub> 代出现较多的新的变异性状,且多数变异性状在 SP<sub>3</sub> 代会继续保持。自 SP<sub>1</sub> 至 SP<sub>3</sub> 代,随着代数的增加,变异株数逐渐增多,而且变异频率也逐代增高。综上所述,就本试验范围内,无论从供试材料的总变异频率,还是单独计算各组的变异率,变异植株占当代群体的比率呈自 SP<sub>1</sub> 至 SP<sub>3</sub> 逐代增高的趋势,变异性状逐渐显现。

推测这些变异在后代繁育中能够使油葵表现更广泛的适应性和更强大的生活力,从而有望选育出优异的品种类型。但是本研究只从形态方面对航天诱变油葵的变异进行对比分析,不能确定其变异是由环境因素引起的,还是由遗传物质引起的。因此,要确定其变异能够遗传以及遗传的稳定性,还须利用分子生物学手段进一步明确航天搭载材料遗传物质变异的真实性和变异机理。然后,还应对有明显变异的个体进行突变性状遗传规律进行研究,并进行考种和异地试验等,从而对航天搭载油葵的变异材料加以利用,以期获得油葵新的种质资源。

### 3.4 航天搭载对油葵观赏性状的影响

观赏向日葵研究已成为观赏园艺研究热点之一。本试验发现,经过航天搭载,有些株系出现花期延长、提早开花的现象,而且这些变化至少能够保持到  $SP_3$  代。可将此特点应用到观赏向日葵的研究中,为培育观赏向日葵新品种提供思路。此外,还发现叶片增多、莲花状花盘变异株系,该变异株系  $SP_3$  代有 2 株植株整体酷似莲花。但是,由于结实部分变异,导致结实困难,没有留下下一代种子。但该株系  $SP_2$  代植株所结种子仍有剩余。可将剩余种子播种,从中继续选择变异株,并通过组培技术手段保留变异种质,从而为观赏花卉方面的研究提供新的材料。

本试验对航天搭载油葵  $SP_1$  至  $SP_3$  代生物学性状进行系统观察和初步研究,结果显示,航天搭载对油葵种子及后代植株有诱变作用,航天搭载油葵种子可获得株高叶片变化、花期长、早熟、种子百粒质量提高等多种变异,从而为进一步选育油葵新的优良品种提供材料。但对于航天搭载对油葵变异的真实性和机理还须进一步探讨,今后的研究可结合生理指标的测定以及分子生物学手段对变异株系进行系统探讨,从而得到航天育种新种质。航天搭载的油葵对已转化的外源基因至少能够保持至  $SP_3$  代,但航天搭载是否会影响外源基因的遗传效率以及外源蛋白的表达效率有待进一步研究。此外,经过航天搭载获得的油葵观赏性状的变异也成为观赏向日葵研究不可或缺的宝贵资源。

### 参考文献:

- [1] 金梦阳,危文亮,严新初.我国向日葵育种研究现状及发展对策[J].内蒙古农业大学学报:自然科学版,2008,29(3):232-236.
- [2] 刘海学,王 罡,季 静.向日葵组织培养及其遗传转化研究进展[J].中国油料作物学报,2005,27(4):95-99.
- [3] Molinier J, Thomas C, Brignou M, et al. Transient expression of *ipt* gene enhances regeneration and transformation rates of sunflower shoot apices (*Helianthus annuus* L.) [J]. Plant Cell Reports, 2002, 21(3):251-256.
- [4] Rauf, S. Breeding sunflower (*Helianthus annuus* L.) for drought tolerance[J]. Communications in Biometry and Crop Science, 2008, 3(1):29-44.
- [5] 刘录祥,郭会君,赵林妹,等.我国作物航天育种 20 年的基本成就与展望[J].核农学报,2007,21(6):589-592,601.
- [6] 王艳芳,王世恒,祝水金.航天诱变育种研究进展[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2006,34(1):9-12,19.
- [7] 王洋洋,韩 雨,盛云燕.空间诱变对薄皮甜瓜  $SP_1$  田间主要性状变异的影响[J].北方园艺,2013,37(24):14-17.
- [8] 邹原东,陈秀新,范继红.空间搭载对芹菜生物量积累及生理特性的影响[J].北方园艺,2013,37(19):41-44.
- [9] 黄海娇,李开隆,刘桂丰,等.航天搭载白桦种子早期生长性状的初步研究[J].核农学报,2010,24(6):1148-1151.
- [10] 耿月伟,郭亚华,谢立波,等.空间诱变对青椒影响的初步研究[J].北方园艺,2012,36(9):119-120.
- [11] 郑 伟,郭 泰,王志新,等.航天搭载大豆  $SP_2$  农艺性状诱变效应初报[J].核农学报,2008,22(5):563-565,606.
- [12] 汤泽生,陈德灿,张先华,等.卫星搭载向日葵种子  $SP_2$  代花部变异株的研究[J].激光生物学报,2006,15(4):418-422.
- [13] 陈卫英,陈真勇,杨 军,等.航天诱变向日葵花部形态特征及传粉生态学研究[J].绵阳师范学院学报,2009,28(2):56-60,67.
- [14] 陈卫英,陈真勇,杨 军.航天诱变向日葵突变株系盛花期的光合特性[J].西北农业学报,2012,21(8):139-145.
- [15] 沈 顺,杨 军,张 田,等.航天诱变向日葵  $SP_7$  植株中顶芽突变系的跟踪观察[J].西华师范大学学报:自然科学版,2010,31(1):61-67.
- [16] Yang J, Shen S, Zhang T, et al. Morphological variation of mutant sunflowers (*Helianthus annuus*) induced by space flight and their genetic background detection by SSR primers[J]. Genetics and Molecular Research: GMR, 2012, 11(3):3379-3388.
- [17] 王俊敏,徐建龙,魏力军,等.空间环境和地面  $\gamma$  辐照对水稻诱变的差异[J].作物学报,2006,32(7):1006-1010.
- [18] 张宪政.植物叶绿素含量测定——丙酮乙醇混合液法[J].辽宁农业科学,1986(3):26-28.
- [19] 王志芬,单成钢,苏学合,等.丹参种子航天搭载的诱变效应研究[J].现代中药研究与实践,2007,21(4):6-8.
- [20] 单成钢,王志芬,苏学合,等.航天诱变黄芩种子对其  $SP_1$  代的影响[J].核农学报,2008,22(2):188-191.
- [21] 姜 莹.航天搭载对白桦种子及苗木性状的影响[D].哈尔滨:东北林业大学,2006:1-64.
- [22] 王世恒,祝水金,张 雅,等.航天搭载茄子种子对其  $SP_1$  生物学特性和 SOD 活性的影响[J].核农学报,2004,18(4):307-310.
- [23] 乔 晓,石海春,柯永培,等.航天搭载对玉米自交系  $SP_1$  的诱变效应[J].四川农业大学学报,2011,29(2):164-167.
- [24] 刘 梅,史振声.卫星搭载处理对玉米  $SP_1$  代诱变效应研究[J].玉米科学,2009,17(3):51-54.
- [25] 李玉全.航天搭载小麦诱变  $SP_1$  代性状的研究[J].中国农学通报,2008,24(10):256-259.
- [26] 徐 荣,刘友刚,孙素琴,等.太空搭载胡芦巴  $SP_1$  代生物效应研究[J].核农学报,2009,23(2):262-265.
- [27] 赵一洲,李正茂,刘福才,等.粳稻盐粳 188 航天诱变  $SP_2$  代的性状变异与选择[J].江苏农业科学,2013,41(6):58-61.
- [28] 王 浩,牛颜冰.航天育种机理的研究进展[J].山西农业大学学报:自然科学版,2009,29(2):119-122.